



**НГТУ  
НЭТИ**

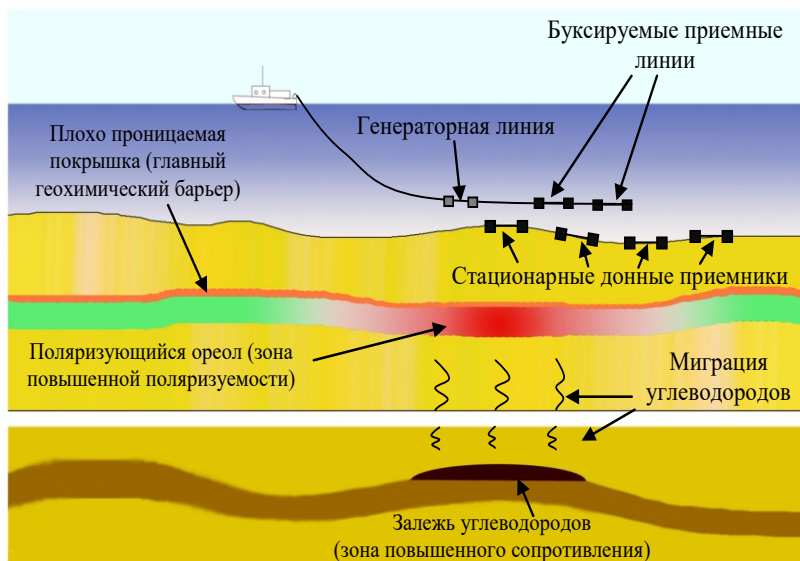
# **Моделирование и анализ технологий морской электроразведки для изучения континентального шельфа**

М.Г. Персова<sup>1</sup>, Ю.Г. Соловейчик<sup>1</sup>, Д.В. Вагин<sup>1</sup>, А.П. Сивенкова<sup>1</sup>,  
Д.С. Киселев<sup>1</sup>, А.С. Киселева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный технический университет

Адрес для связи: [mpersova@mail.ru](mailto:mpersova@mail.ru)

# Программное обеспечение 3D-моделирования / 2.5D-, 3D-инверсии



Программное обеспечение состоит из двух подсистем:

- ✓ подсистема численного 3D-моделирования электромагнитных полей;
- ✓ подсистема многомерных инверсий ЭМ данных.

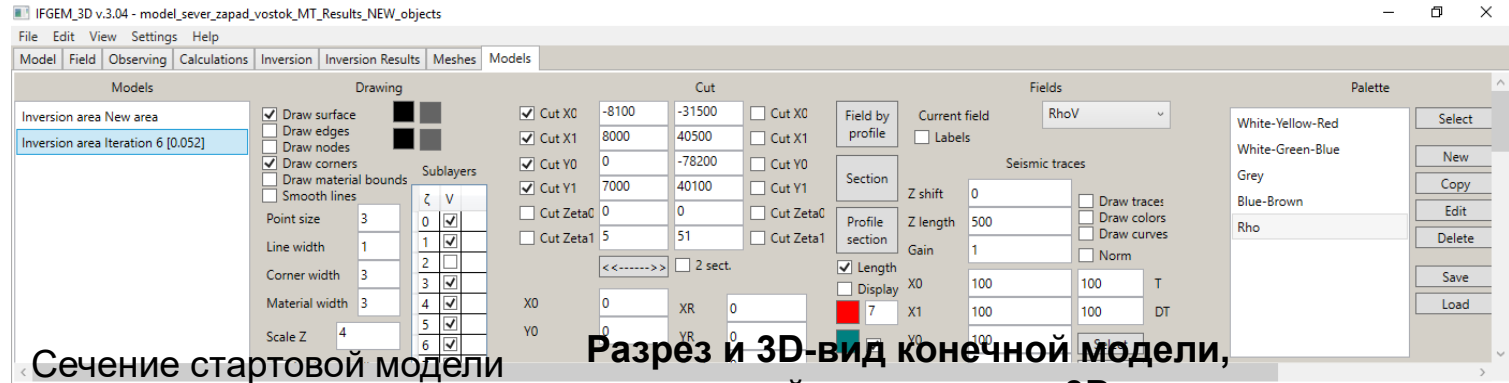
Подсистема численного 3D-моделирования электромагнитных полей используется на этапе проектирования работ для:

- ✓ анализа чувствительности технологии для конкретных геоэлектрических условий;
- ✓ проектирования оптимальных систем наблюдений с использованием процедур многомерной инверсии;
- ✓ тестирования процедур инверсии на синтетических данных с определением возможных неопределенностей.

Вторая подсистема предоставляет возможность:

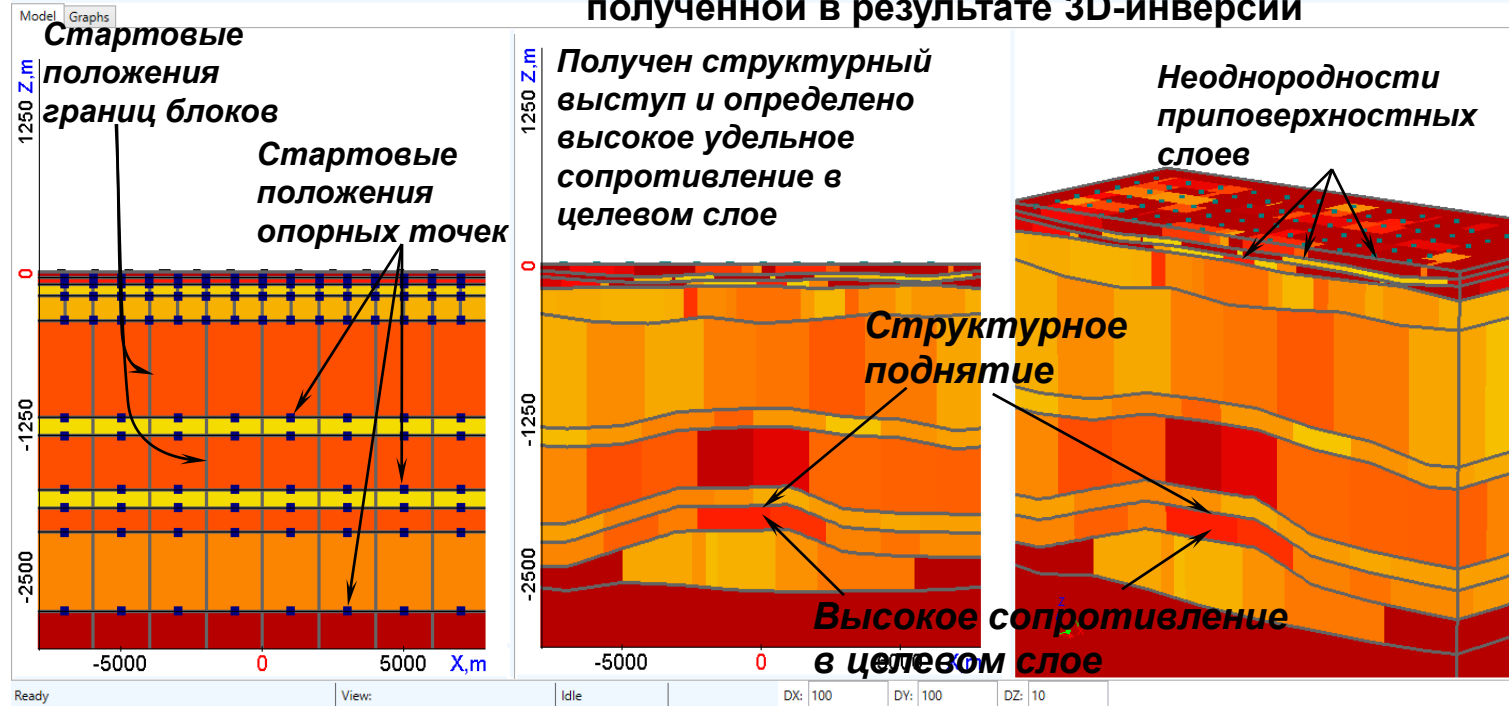
- ✓ многомерных инверсий практических данных электроразведки для различных технологий;
- ✓ оценки результативности технологий инверсии в условиях возможных неопределенностей с использованием синтетических данных.

# Представление стартовой геоэлектрической модели и результат 3D-инверсии



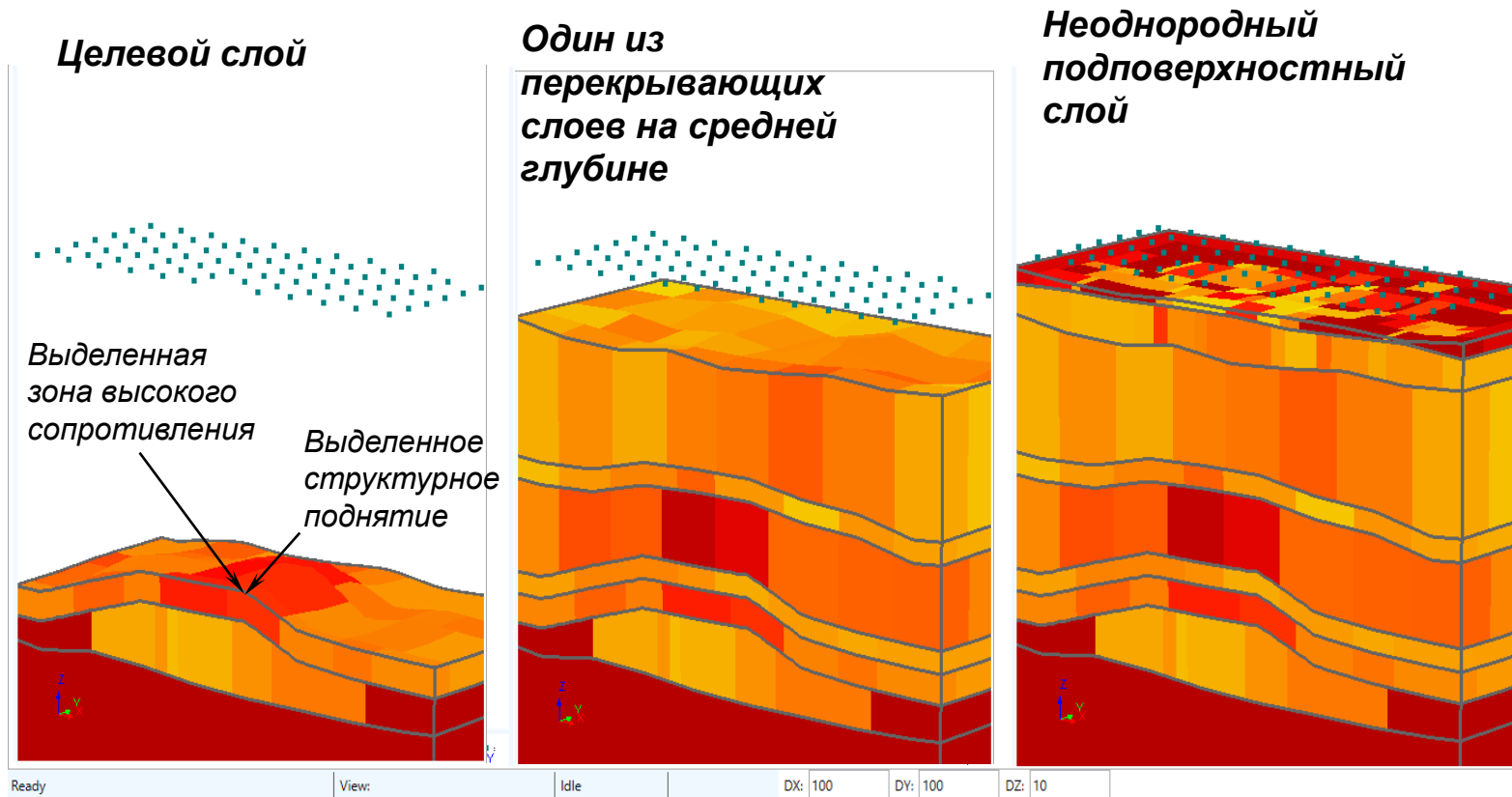
Сечение стартовой модели

Разрез и 3D-вид конечной модели, полученной в результате 3D-инверсии



# Представление стартовой геоэлектрической модели и результат 3D-инверсии

Срезы на разных слоях итоговой 3D-модели, полученные в результате 3D-инверсии:



Прибрежная зона в Западной Сибири

# Целевой функционал в 3D-инверсии

При выполнении 3D-инверсии минимизируется функционал вида:

$$\Phi^\alpha(\mathbf{b}) = \sum_{l=1}^{kL} \sum_{w=1}^{kW} \sum_{t=1}^{kT} (\omega_{lwt} \delta \mathbf{\epsilon}_{lwt}(\mathbf{b}))^2 + \sum_{m=1}^M \alpha_m (b_m - \bar{b}_m)^2 \rightarrow \min_{b_m}$$

$kT$  - количество времен;  $kW$  - количество положений приемников;  $kL$  - количество типов данных;

$\delta \mathbf{\epsilon}_{lwt}$  - разность расчетных и практических сигналов;  $\omega_{lwt}$  - весовые функции;  $M$

$\mathbf{b}$  - вектор параметров;  $\alpha_m$  - параметры регуляризации, подбираемые адаптивно;

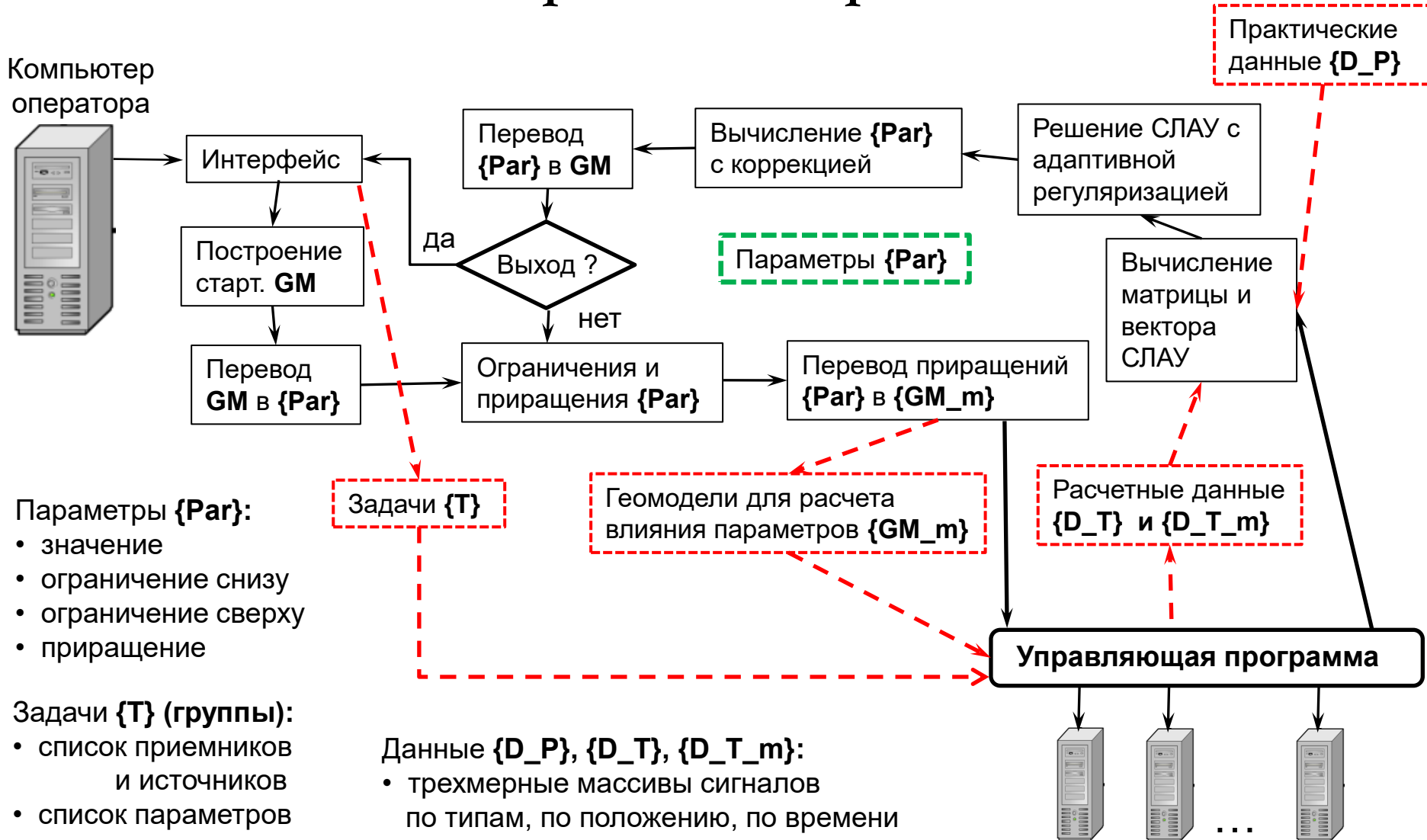
Линеаризация невязок и минимизация функционала приводят к СЛАУ:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{\alpha}) \Delta \mathbf{b} = \mathbf{f}$$

$$A_{ps} = \sum_{l=1}^{kL} \sum_{w=1}^{kW} \sum_{t=1}^{kT} \omega_{lwt}^2 \frac{\partial(\delta \mathbf{\epsilon}_{lwt})}{\partial b_p} \frac{\partial(\delta \mathbf{\epsilon}_{lwt})}{\partial b_s}, \quad \alpha_{ps} = \begin{cases} \alpha_p, & \text{если } p = s, \\ 0, & \text{если } p \neq s, \end{cases}$$

$$f_p = - \sum_{l=1}^{kL} \sum_{w=1}^{kW} \sum_{t=1}^{kT} \omega_{lwt}^2 \delta \mathbf{\epsilon}_{lwt}(\bar{\mathbf{b}}) \frac{\partial(\delta \mathbf{\epsilon}_{lwt})}{\partial b_p}, \quad p, s = 1 \dots M$$

# Общая схема процедуры 3D-инверсии и схема ее параллельной реализации



# Общая схема процедуры 3D-инверсии и схема ее параллельной реализации

## Управляющая программа:

- распределение задач по ВУ (группа  $T_i$  на ВУ $_n$ );
- посылка/получение данных от ВУ;
- контроль аварийных ситуаций на ВУ и перезапуск задач

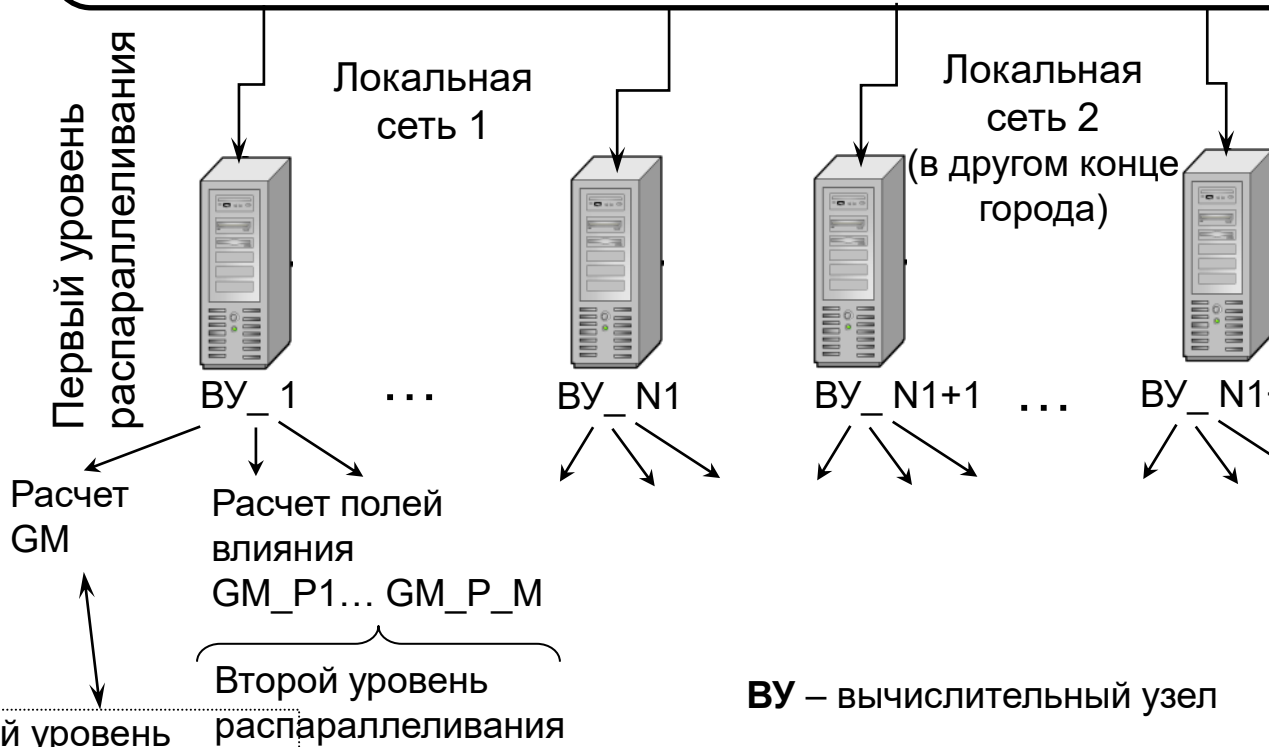
Модели **GM**, {**GM $_m$** }:

## Слой:

- электрофизические параметры
- поверхности-сплайны
- шаблонные z-координаты

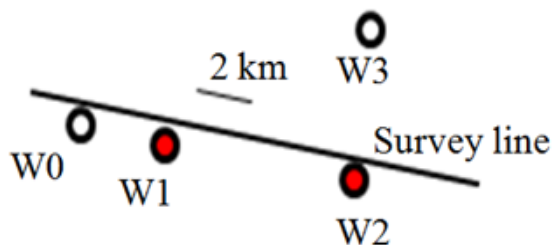
## 3D-неоднородности:

- электрофизические параметры
- форма в плане: четыре координаты
- шаблонные z-координаты



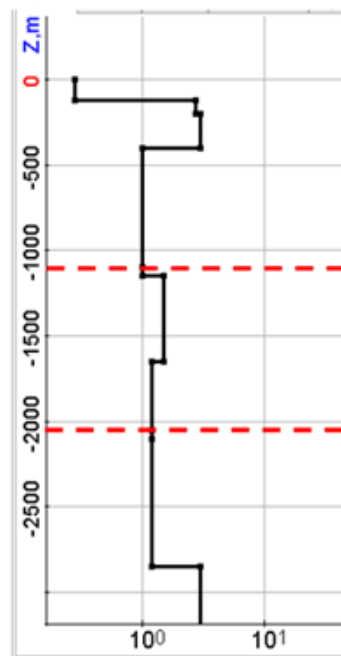
**ВУ** – вычислительный узел

# Результаты 3D-инверсии на тестовом профиле в Северном море



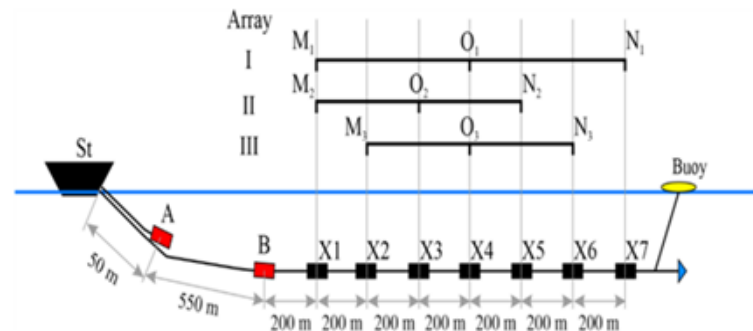
Расположение скважин относительно линии профиля

- пустые скважины
- скважины с наличием УВ



Зависимость сопротивления вмещающей среды от глубины

— — — положение продуктивных интервалов по глубине



First difference:  
 $M_1N_1: \Delta U_{X1X7}$   
 $M_2N_2: \Delta U_{X1X5}$   
 $M_3N_3: \Delta U_{X2X6}$

Second difference:  
 $M_1O_1N_1: \Delta^2 U_{X1X4X7}$   
 $M_2O_2N_2: \Delta^2 U_{X1X3X5}$   
 $M_3O_3N_3: \Delta^2 U_{X2X4X6}$

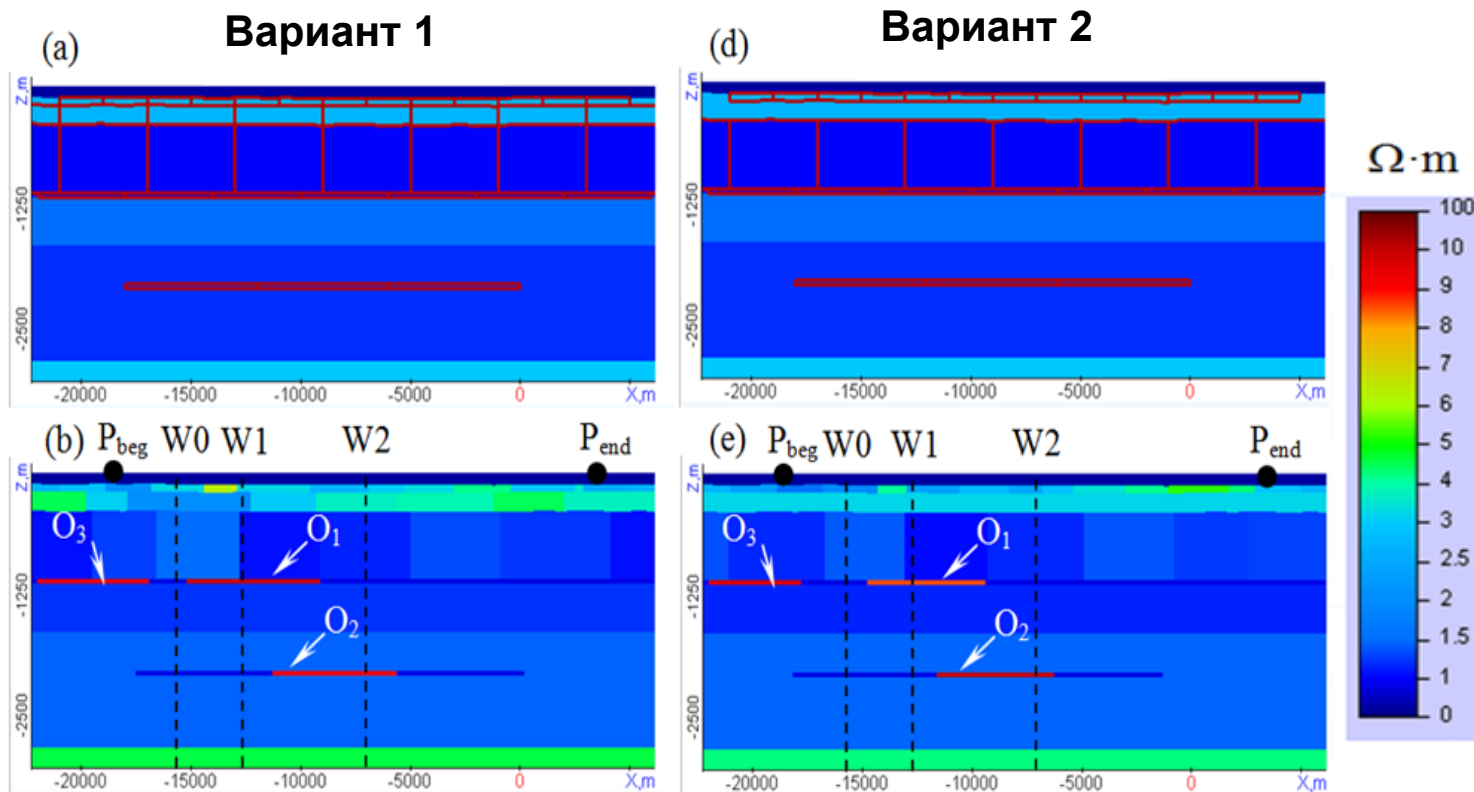
Буксируемая система метода ДНМЭ\*

\* Legeydo, P. Y., & Ageenkov, E. V., 2011. Differentially-normalized Method of Electroinvestigation (DNME)-An Efficient Instrument for HC Exploration Off-and Onshore. *In SPE Arctic and Extreme Environments Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/149910-MS>



# Результаты 3D-инверсии на тестовом профиле в Северном море

Стартовые модели

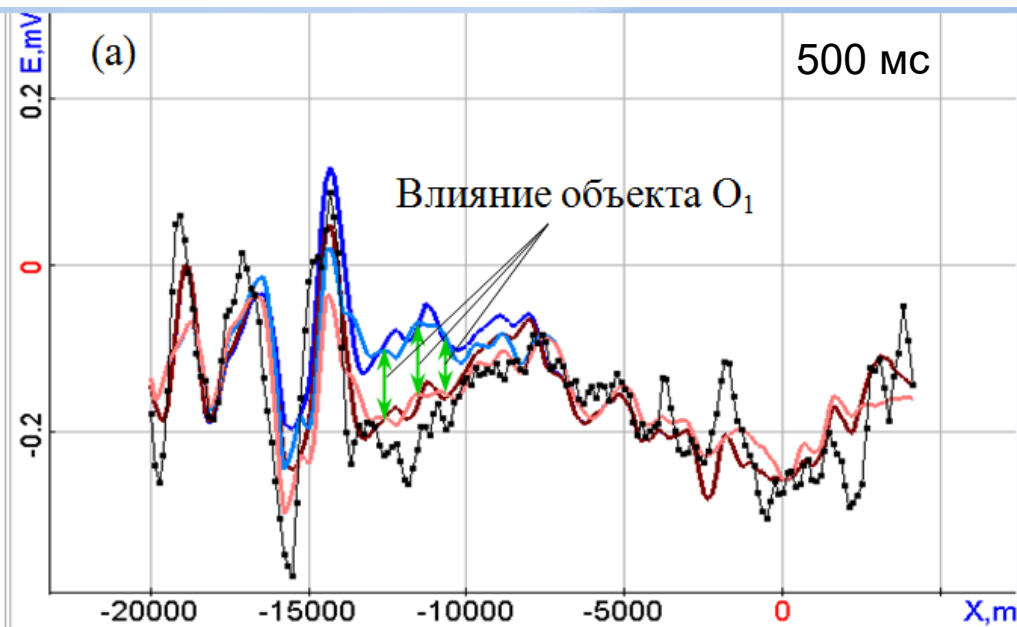


Результаты  
3D-инверсии

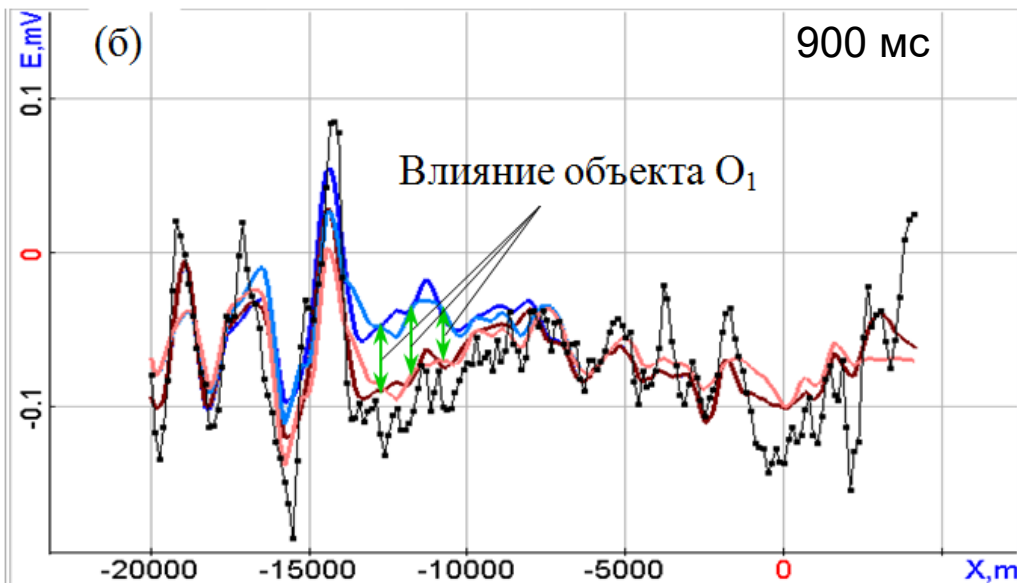
W0 – пустая скважина; W1 – УВ на уровне верхнего и нижнего горизонтов;  
W2 – УВ на уровне нижнего горизонта

Результаты 3D-инверсии данных морской электроразведки устойчиво подтверждают наличие УВ (объекты повышенного сопротивления  $O_1$  и  $O_2$ ) в скважинах W1 и W2 и отсутствие УВ в скважине W0

# Анализ чувствительности к целевым объектам

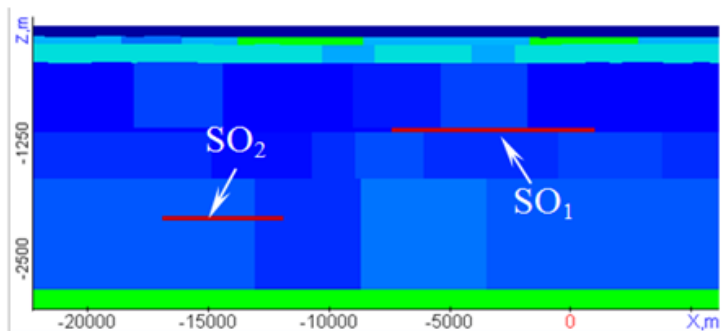


- Наблюдаемые данные
- Расчетные данные в варианте 1
- Расчетные данные в варианте 1 с исключением целевого объекта
- Расчетные данные в варианте 2
- Расчетные данные в варианте 2 с исключением целевого объекта

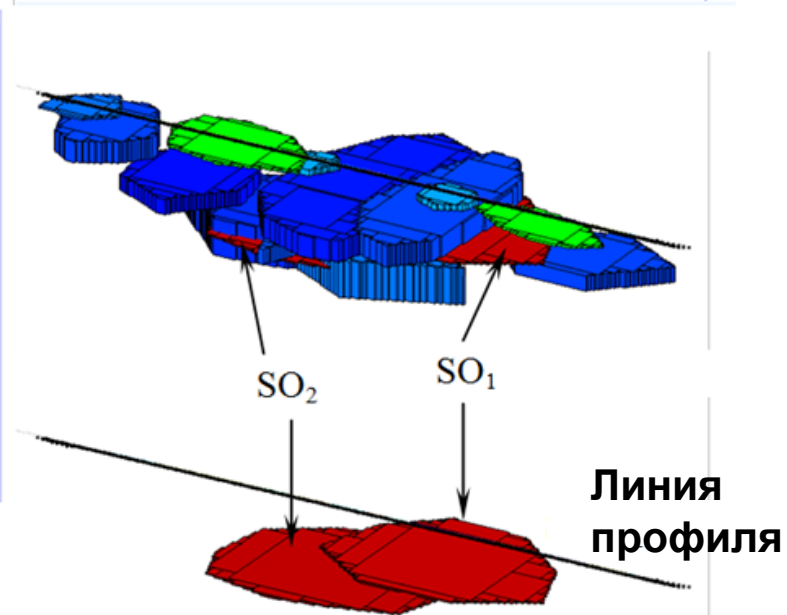
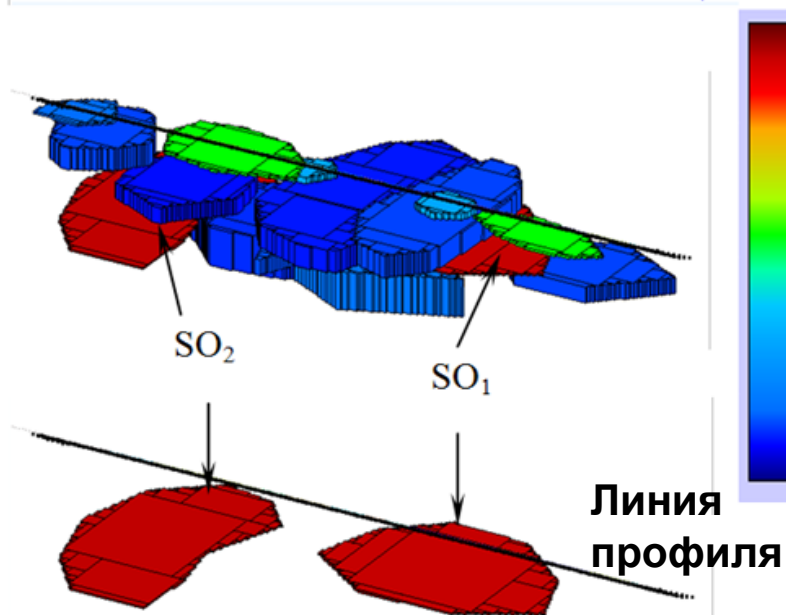
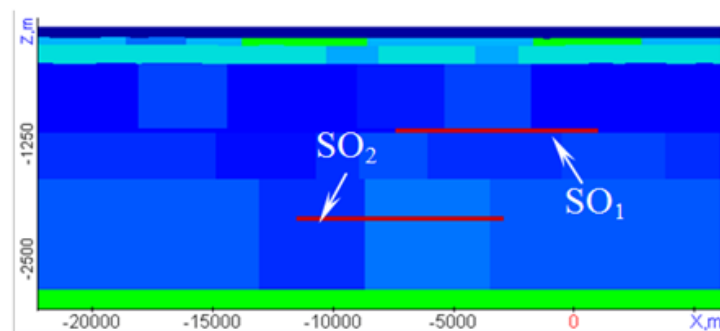


# Обоснование результатов 3D-инверсии на синтетических данных

a) Модель 1



b) Модель 2

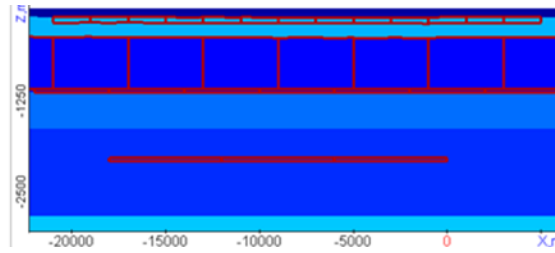
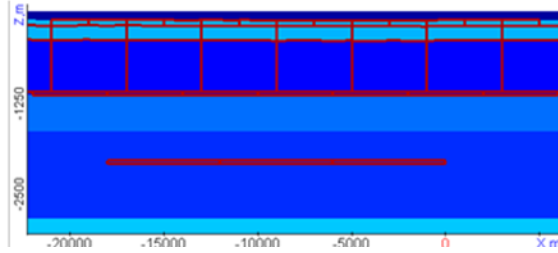


# Обоснование результатов 3D-инверсии на синтетических данных

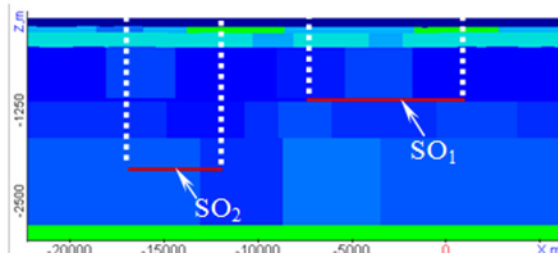
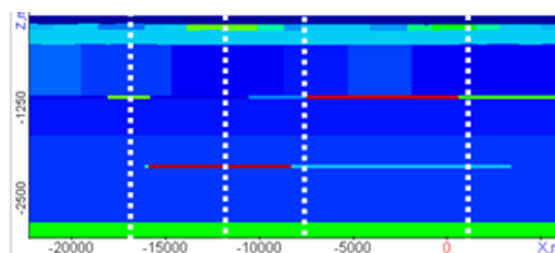
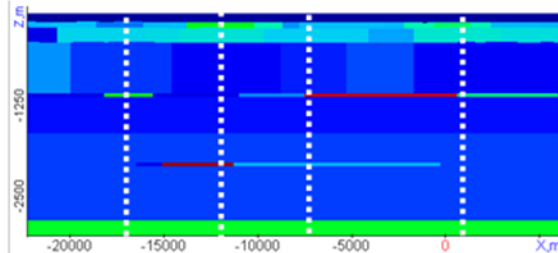
Вариант 1

Стартовые модели

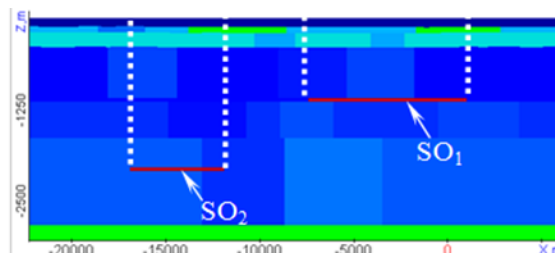
Вариант 2



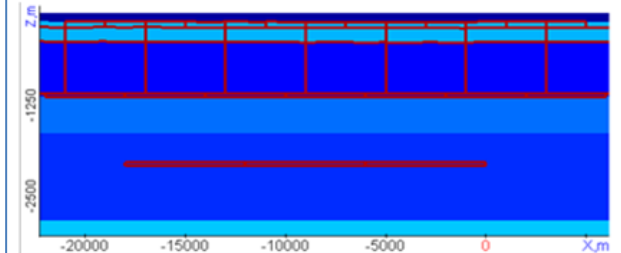
Результаты 3D-инверсии



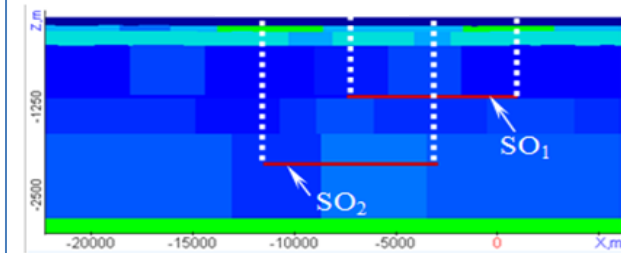
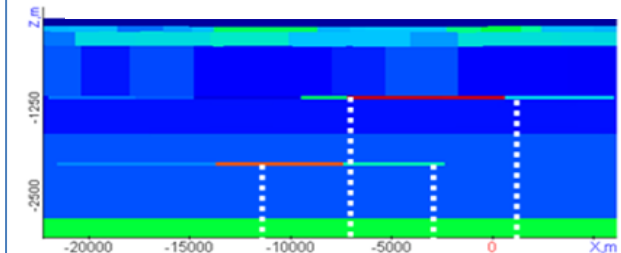
Истинная модель 1



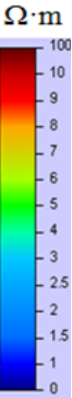
Вариант 1  
Стартовая модель



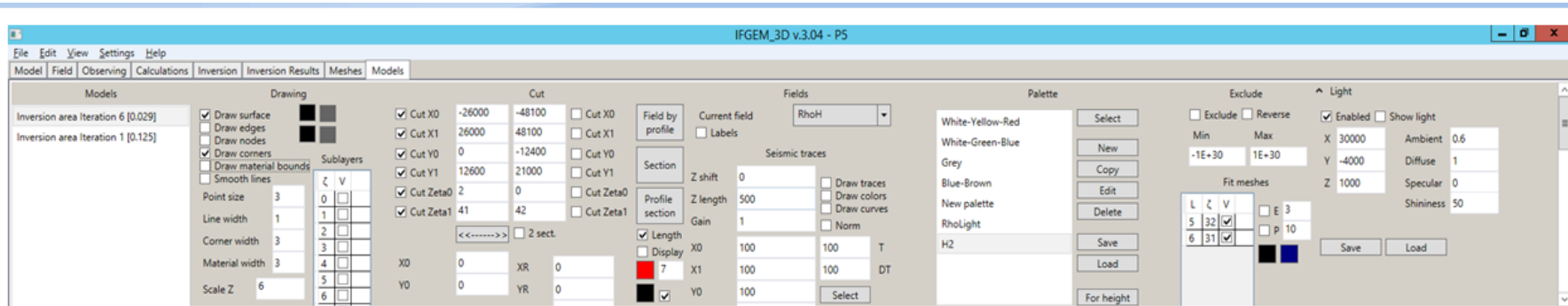
Результаты 3D-инверсии



Истинная модель 2



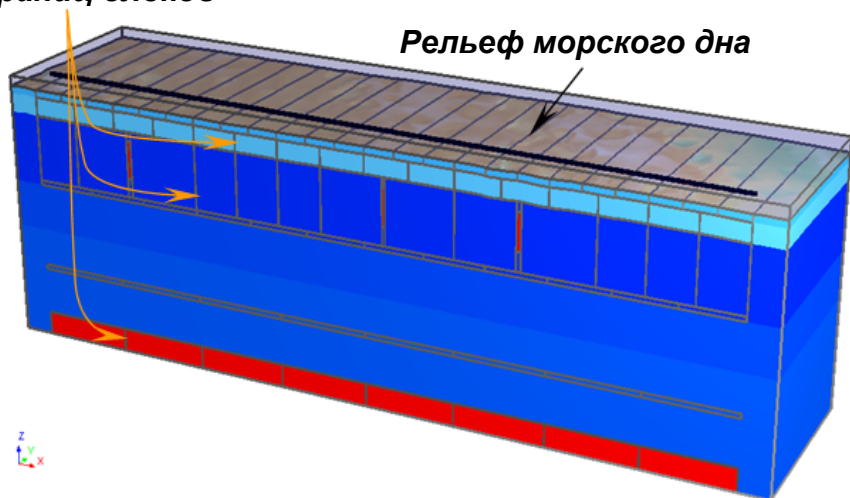
# Результаты 3D-инверсии на рабочем профиле в Северном море



Сечение стартовой модели

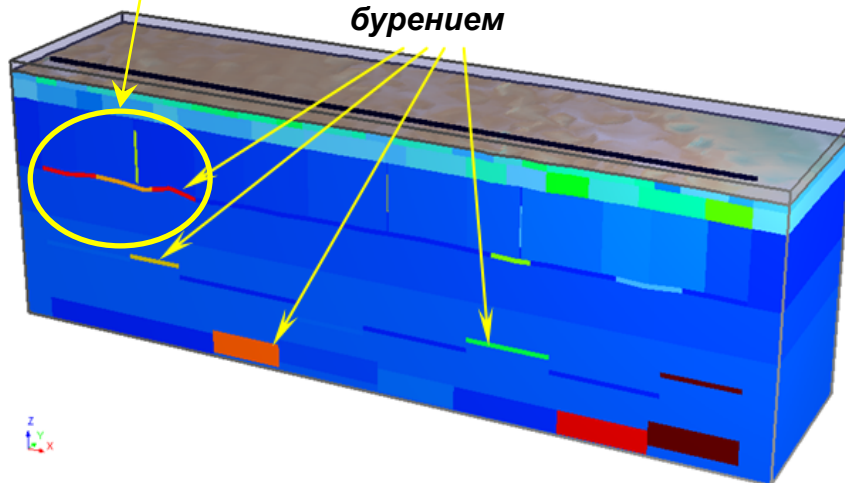
Сечение восстановленной модели

Стартовые  
положения  
границ блоков

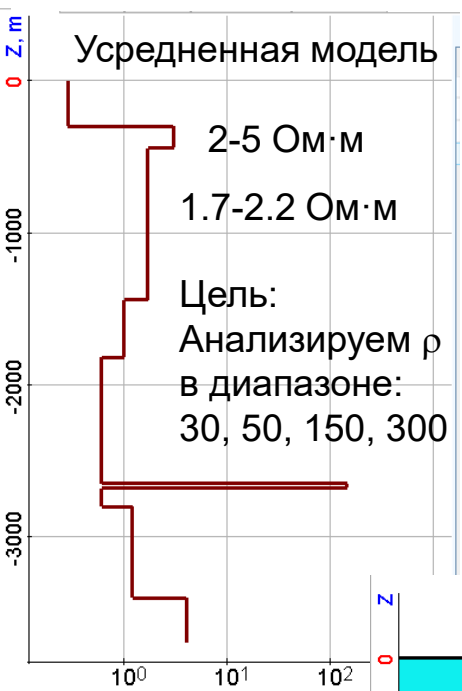
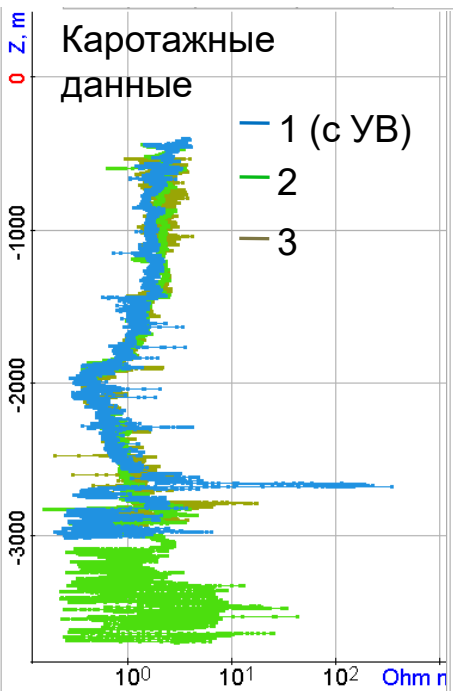


Месторождение

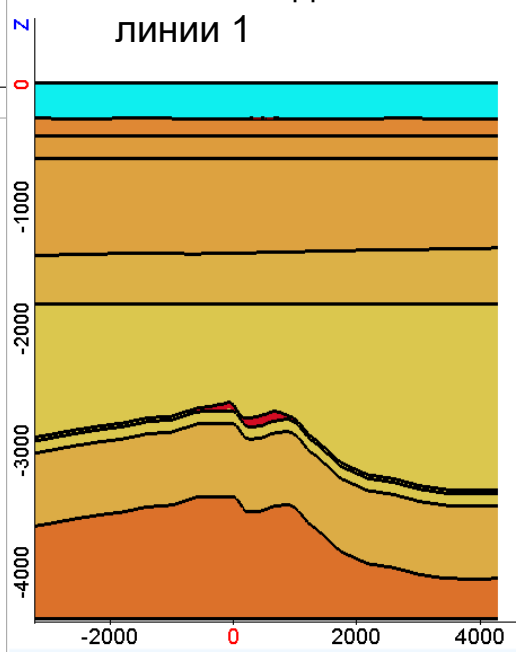
Зоны с высоким  
сопротивлением в целевых  
слоях. Подтверждены  
бурением



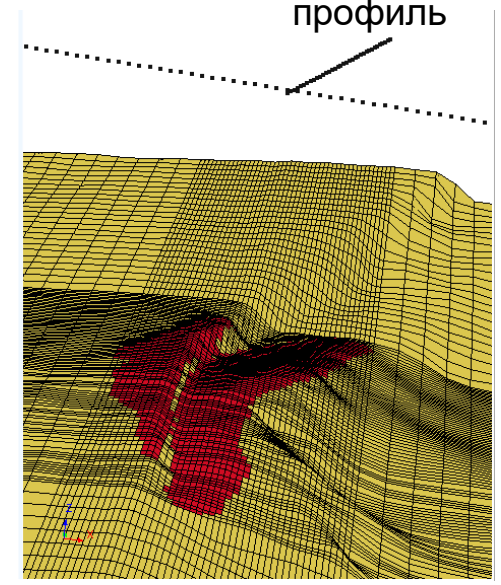
# Проектирование работ (пример 1)



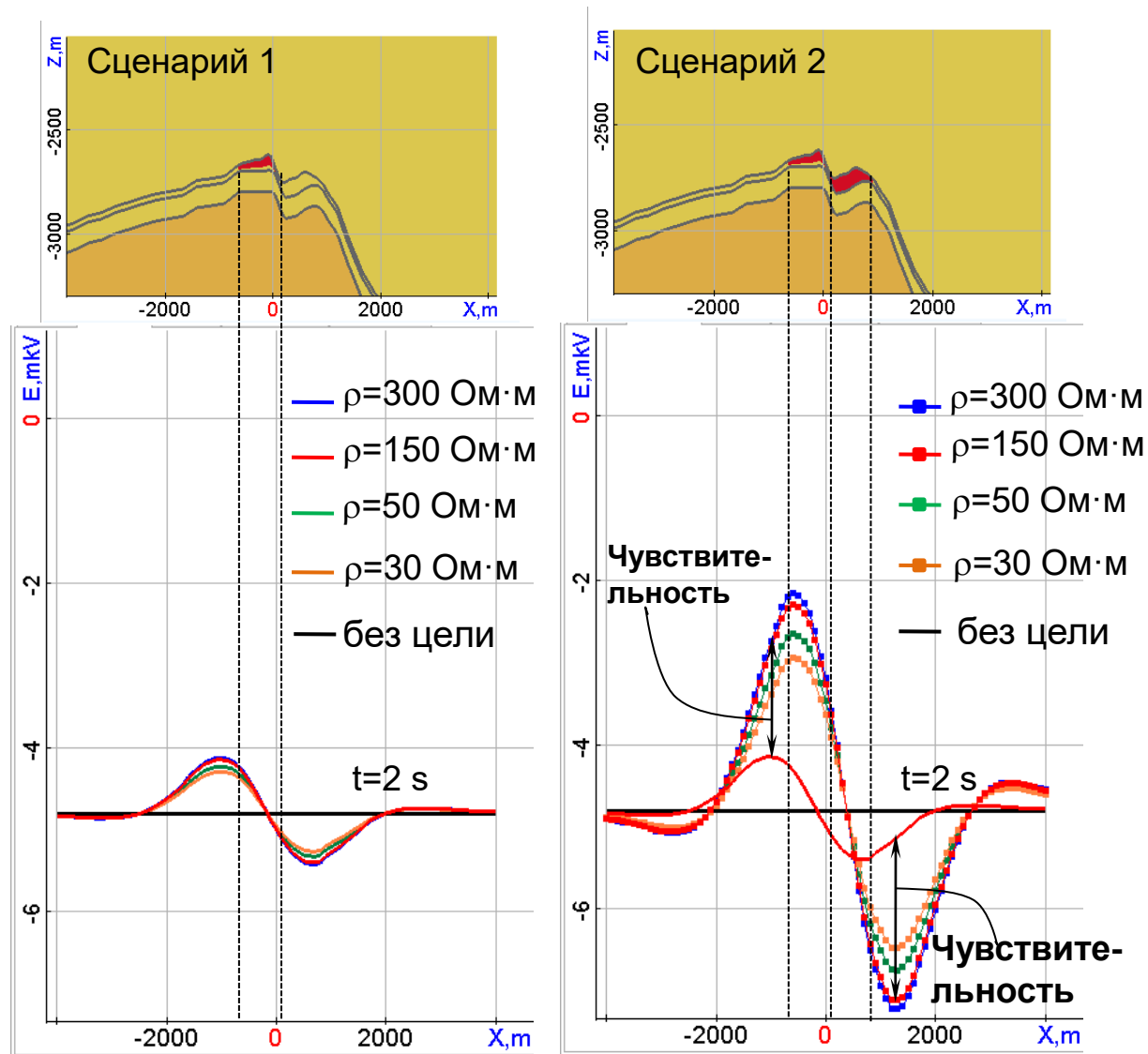
Сечение вдоль линии 1



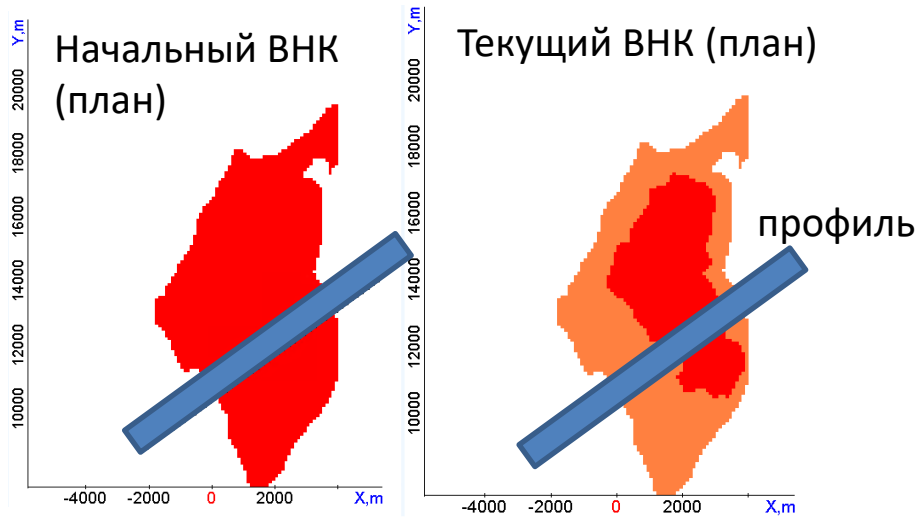
Срез модели по целевому объекту профиль



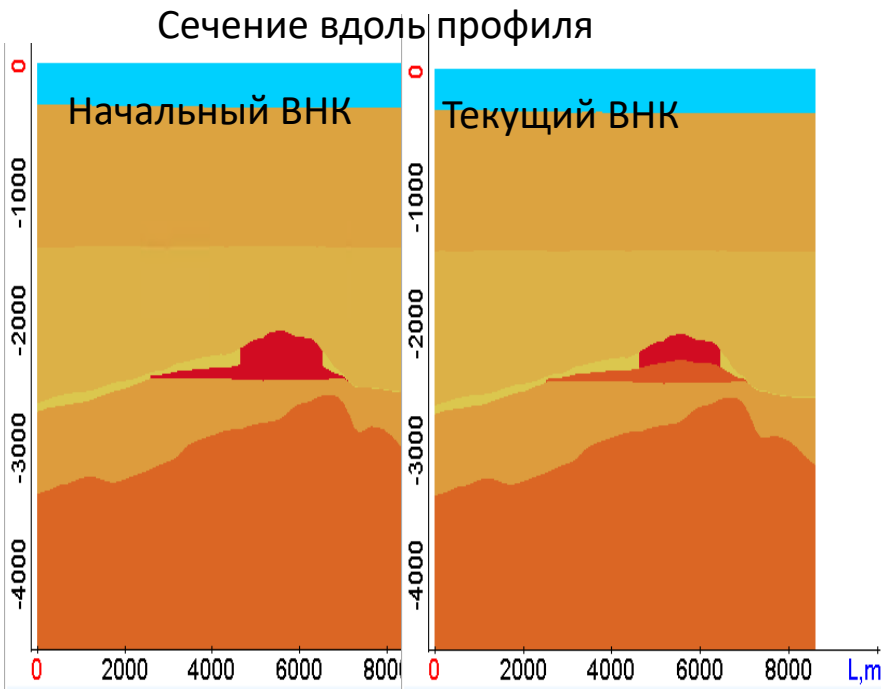
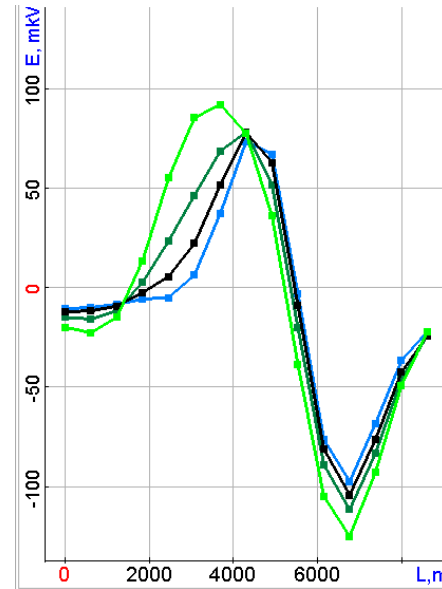
# Проектирование работ (пример 1)



# Анализ возможностей улучшения модели резервуара путем комбинирования гидродинамического моделирования, автоадаптации и результатов ЭМ мониторинга: разные сопротивления (насыщенности) после вытеснения



Сигналы по профилю при t=1.5 с



- Начальный ВНК : 130 Ом·м в цели
- Текущий ВНК : 30 Ом·м после вытеснения
- Текущий ВНК : 10 Ом·м после вытеснения
- Текущий ВНК : 3 Ом·м после вытеснения

Наблюдается чувствительность ЭМ сигналов к различным сопротивлениям после вытеснения нефти и позволяет определить, какая граница смещается и как.



# Заключение

Разработанное программное обеспечение и методики исследований позволяют эффективно решать следующие задачи:

- 1) проектирование полевых работ;
- 2) анализ работоспособности технологий;
- 3) разработка новых технологий;
- 4) 3D-обработка данных морской электроразведки с построением трехмерных геоэлектрических моделей;
- 5) анализ чувствительности данных к целевым объектам и оценка надежности результатов многомерной инверсии.

Перспектива развития: создание мультифизических 3D-инверсий ЭМ данных в комплексе с гидродинамическим моделированием в задачах мониторинга нефтегазовых месторождений.